Ressources naturelles Canada
Natural Resources Canada

Validation d'un modèle de phénologie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette pour les gradients environnementaux et génétiques : applications pour la lutte contre la tordeuse et les prévisions relatives aux changements climatiques

Rapport provisoire

Jean-Noël Candau, John Dedes, Chris J.K. MacQuarrie, Kerry Perrault, Amanda Roe et Ashlyn Wardlaw

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts

Rapport d'information GLC-X-20F

Canada

Validation d'un modèle de phénologie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette pour les gradients environnementaux et génétiques : applications pour la lutte contre la tordeuse et les prévisions relatives aux changements climatiques

Jean-Noël Candau, John Dedes, Chris J.K. MacQuarrie, Kerry Perrault, Amanda Roe et Ashlyn Wardlaw

Publié par
Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Grands Lacs,
1219, rue Queen Est
Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 2E5

Rapport d'information : GLC-X-20F
2018

Bibliothèque et Archives Canada offre des renseignements sur le catalogage de cette publication.

Validation d'un modèle de phénologie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette pour les gradients environnementaux et génétiques : applications pour la lutte contre la tordeuse et les prévisions relatives aux changements climatiques.
(Rapport d'information, GLC-X-20F)

Publié aussi en anglais sous le titre : « Validation of a spruce budworm phenology model across environmental and genetic gradients: applications for budworm control and climate change predictions".
J.-N. Candau, J. Dedes, C.J.K. MacQuarrie, K. [illegible]rault, A. Roe, and A. Wardlaw

Monographie électronique en format PDF.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 978-0-660-25661-0
N° de catal. : Fo123-2/20-2018F-PDF

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCan) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCan ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCan. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCan à droitdauteur.copyright@rncan-nrcan.gc.ca.

©Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2018

Table des matières

Liste des tableaux v

Liste des figures v

Liste des annexes et des figures ..... - 6 -

Annexe A : Temps de développement simulés c. observés de la colonie du SPI à 7 températures constantes – Développement global ..... - 6 -

Annexe B : Temps de développement simulés c. observés de la colonie du SPI à 7 températures constantes – Développement du stade larvaire ..... - 6 -

Résumé ..... - 7 -

Introduction ..... - 7 -

Partie 1 : Taux de développement des colonies de laboratoire à différentes températures - 8 -

Matériel et méthodes ..... - 8 -

Résultats ..... - 9 -

Discussion ..... - 10 -

Partie 2 : Taux de développement pour les gradients environnementaux et génétiques - 10 -

Méthodes d'échantillonnage et d'élevage pour les populations sauvages ..... - 10 -

Méthode d'extraction ..... - 11 -

Méthodes d'élevage ..... - 12 -

Une analyse de 20 ans sur la phénologie simulée de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans son aire de distribution ..... - 13 -

Taux de développement de la colonie de l'Ontario à 30 C et 35° C ..... - 16 -

Résumé ..... - 19 -

Remerciements ..... - 20 -

Références ..... - 21 -

Annexe A : Temps de développement simulés c. observés de la colonie du SPI à 7 températures constantes – Développement global ..... - 22 -

Annexe B : Temps de développement simulés c. observés de la colonie du SPI à 7 températures constantes – Développement du stade larvaire ..... - 29 -

Liste des tableaux

Tableau 1 Résumé des sites d'échantillonnage.

Tableau 2 Taux d'infection dans les échantillons sauvages prélevés en 2016 et 2017.

Liste des figures

Figure 1. Localisation des populations sauvages échantillonnées en 2017.

Figure 2. Tendances de la température quotidienne moyenne entre 1998 et 2017 pour 5 stations météorologiques à proximité des sites d'échantillonnage : Inuvik (T.N.-O.), High Level (Alb.), Timmins (Ont.), Baie Comeau (Qc) et Fredericton (N.-B.).

Figure 3. Temps de développement simulés à chaque stade larvaire pour cinq stations météorologiques à proximité des sites d'échantillonnage.

Figure 4. Temps de développement simulé pour atteindre le stade pupal près des sites d'échantillonnage des populations sauvages.

Figure 5. Développement moyen des instars de la colonie de l'Ontario par rapport à la simulation de BIOSIM à 30 °C.

Figure 6. Développement des instars de la colonie de l'Ontario par rapport à la simulation de BIOSIM et à la colonie du SPI à 30 °C.

Figure 7. Développement moyen des instars de la colonie de l'Ontario par rapport à la simulation de BIOSIM à 35 °C.

Figure 8. Développement des instars de la colonie de l'Ontario par rapport à la simulation de BIOSIM et à la colonie du SPI à 35 °C.

Liste des annexes et des figures

Annexe A : Temps de développement simulés c. observés de la colonie du SPI à 7 températures constantes – Développement global

Figure A1. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 5 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Figure A2. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 10 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Figure A3. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 15 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Figure A4. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 20 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Figure A5. Comparaison entre les temps de développement simulés et observés à 25 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Figure A6. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne cntinue) à 30 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Figure A7. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 35 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Annexe B : Temps de développement simulés c. observés de la colonie du SPI à 7 températures constantes – Développement du stade larvaire

Figure B1. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 5 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Figure B2. Comparaison entre les temps de développement simulés et observés à 10 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Figure B3. Comparaison entre les temps de développement simulés et observés à 30 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Figure B4. Comparaison entre les temps de développement simulés et observés à 35 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Résumé

Ce rapport présente les résultats de travaux de recherche en cours sur la variabilité du taux de développement de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clemens) à travers son aire de distribution. La première phase de cette étude consistait à élever des colonies du Services de production d'insectes (SPI) de Sault Ste. Marie à 7 températures constantes (i.e. 5-35 °C). Ceci nous a permis de développer et tester les protocoles d'élevage qui seront utilisés par la suite. Cela nous a aussi donné la possibilité de comparer la phénologie de colonies isolées des populations sauvages depuis de nombreuses générations avec les prédictions du modèle de la biologie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette BIOSIM. Nos résultats indiquent que le modèle est bien ajusté à la phénologie des populations de laboratoire pour des températures comprises entre 15-25 °C. Pour les températures plus basses ou plus hautes (5-10 °C et 30-35 °C, respectivement), le modèle surestime le taux de développement. En 2017, nous avons complété avec succès la deuxième phase du projet qui consistait à établir des colonies à partir de populations sauvages échantillonnées dans cinq endroits répartis à travers l'aire de distribution de la tordeuse, depuis Inuvik jusqu'au nord du Québec. Une analyse de tendance des estimations de phénologie de la tordeuse pour les endroits échantillonnés durant la période 1998-2017 révèle une tendance vers un développement larvaire total (L2-L6) plus rapide statistiquement significatif pour Inuvik (T.N.-O) et pratiquement significatif pour High Level (Alb.). Les échantillons prélevés dans les 5 endroits ont été élevés jusqu'à la génération suivante de façon à assurer assez d'individus dans chaque colonie pour réaliser 7 traitements a différentes températures. Les résultats préliminaires obtenus sur la colonie de l'Ontario à 30 °C et 3 5°C sont similaires aux résultats obtenus avec les colonies du SPI, i.e. le modèle de développement larvaire de la tordeuse surestime le taux de développement à ces températures. Le reste des traitements pour la colonie de l'Ontario et les traitements pour la colonie du Québec sont en cours. Les autres colonies sont encore en diapause.

Introduction

La capacité à prévoir précisément la phénologie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette est importante pour de nombreux aspects de la gestion de cet insecte. Dans les programmes de lutte, l'efficacité de l'ensemble des stratégies actuelles de lutte antiparasitaire intégrée contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette repose sur la capacité à cibler le bon stade de développement. En prédisant la dynamique de la population, un modèle fiable de la phénologie de l'émergence des adultes devient un élément clé de la modélisation de la dispersion à l'échelle du paysage, un facteur de plus en plus reconnu comme essentiel dans la dynamique à grande échelle de la tordeuse. Dans les prévisions à plus long terme, une connaissance précise de la phénologie de la tordeuse, de façon intrinsèque et en lien avec la phénologie de ses hôtes, est particulièrement importante pour notre capacité à prévoir les conséquences potentielles des changements climatiques sur la distribution de cet insecte.

Le modèle le plus précis actuellement disponible pour prédire la phénologie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette sur de grandes étendues est le modèle Spruce Budworm Biology de BIOSIM (Régnière et coll., 2014). Ce modèle a été testé à plusieurs reprises sur des observations de terrain. Dans la plupart des cas, il est parvenu à prévoir la phénologie de la tordeuse avec une exactitude

exceptionnelle. Cependant, il faut noter que les données utilisées jusqu'à présent pour concevoir et valider ce modèle proviennent d'une étendue géographique assez limitée (c.-à-d., approximativement entre 45 °/ 50 ° N et 70 °/ 90 ° O). Une comparaison avec la distribution actuelle de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (entre 43 °/ 68 ° N et 55 °/ 133 ° O) remet finalement en cause les limites de l'applicabilité du modèle. Ce projet étudie la variabilité des taux de développement de la tordeuse des bourgeons de l'épinette à chaque stade larvaire dans la distribution géographique de l'insecte. Une attention particulière est accordée à la détection de la variation clinale des taux de développement en lien avec les gradients environnementaux ou génétiques. En comparant au modèle de Régnière les taux observés sur une grande aire de distribution, nous pourrons mieux définir les limites géographiques de l'applicabilité du modèle.

Partie 1 : Taux de développement des colonies de laboratoire à différentes températures

La première étape de ce projet a consisté à élever des colonies de laboratoire à différentes températures constantes. Cet exercice avait pour principal objectif de déterminer si les relations entre la température et les taux de développement dans ces colonies, qui avaient été élevées pendant des dizaines de générations à des régimes de température constants, avaient « dérivé » des observations faites 30 ans auparavant. Il a également permis d'établir et de tester des protocoles d'élevage particuliers, de tester l'équipement d'élevage et de former le personnel. À notre connaissance, aucun élevage en masse de la tordeuse des bourgeons de l'épinette à différentes températures pendant tout son cycle de vie n'avait été réalisé depuis le milieu des années 1980, si bien qu'il a fallu rétablir en grande partie l'expertise liée à ce type d'expérience.

Matériel et méthodes

Les colonies de laboratoire ont été obtenues auprès du SPI du Centre de foresterie des Grands Lacs (Sault Ste. Marie). Chaque essai de température a commencé avec un grand nombre de larves de stade L2 hivernantes qui ont été maintenues à 25±3 °C, 55±10 % HR et 16L:8O, indépendamment du traitement thermique expérimental, jusqu'à l'émergence de la diapause. Parmi les larves de stade L2 ayant émergé, 250 larves ont été prélevées, placées dans des coupes individuelles sur un milieu nutritif artificiel (fourni par le SPI) et étiquetées pour les besoins de l'expérience. Les 250 coupes ont ensuite toutes été placées dans une chambre de croissance (Conviron) à une température expérimentale définie. Nous avons testé sept traitements thermiques : 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, et 35 °C, toutes ±1 °C avec 70±20 % HR et 14L:10O. La température de chaque chambre était archivée chaque minute à l'aide d'un enregistreur de données (Hobo). Sur les 250 larves de chaque chambre, 200 ont été surveillées quotidiennement pour la mue, tandis que les 50 larves restantes ont été laissées intactes jusqu'à la pupaison et utilisées comme réserve pour l'accouplement et les analyses génétiques. Le suivi quotidien a consisté à vérifier le statut (vivante/morte) et le stade larvaire de chaque larve. Lorsque le développement a atteint le stade pupal, le sexe de chaque spécimen a été déterminé en comptant le nombre d'anneaux abdominaux. Les adultes ont été accouplés peu de temps après leur émergence. Après la récolte, les œufs ont éclos à 20 °C, peu importe le traitement thermique antérieur. Les larves du premier stade ont été élevées à la même température que les larves L2 en prédiapause. Les larves L2

en prédiapause ont ensuite été placées dans une chambre à 4 °C pendant 24 semaines pour la diapause. Le protocole d'élevage a été réitéré pour la deuxième génération; le traitement thermique de la génération F1 a été identique au traitement de la population parente.

Les températures extrêmes proches des seuils de développement (minimum et maximum) ont des effets néfastes sur le développement larvaire et entraînent des taux élevés de mortalité. Les taux de développement à ces températures doivent être estimés en utilisant des transferts de température (Régnière et al., 2012). Cette technique consiste à élever le stade larvaire à la température extrême pendant suffisamment longtemps pour mesurer le développement, en évitant toutefois des taux de mortalité élevés, puis à passer à une température plus favorable pour achever le stade de développement, et enfin à recommencer pour le prochain stade larvaire. Les transferts de température ont été appliqués aux traitements thermiques de 5 °C, 10 °C, 30 °C et 35 °C. La température de transfert a été fixée à 20 °C pour achever les stades de développement.
Les taux de développement observés ont été comparés au modèle phénologique de Régnière en appliquant l'ensemble des équations publiées dans le rapport de Régnière et al. (2012) aux températures enregistrées dans chaque chambre.

Résultats

Nous présenterons ici les résultats pour la première génération élevée entre 5 °C et 35 °C. Les expériences pour la deuxième génération sont toujours en cours au moment de la rédaction de ce rapport. Les taux de développement simulés et observés sont représentés ici en tant que temps de développement moyen des instars (annexe A) et du stade larvaire (annexe B).
À 5 °C (fig. A1), le développement simulé est systématiquement plus rapide que le développement observé (R^2 = 0,69). Les différences sont particulièrement prononcées aux stades L2 et L4 (fig. B1). Au stade L4, le développement observé compte 15 jours de mue en plus que le développement simulé. Cette différence dans le temps de développement peut être en partie due au fait que BIOSIM simulera une augmentation immédiate du taux de développement lorsque les larves sont transférées à 20 °C, bien qu'il y ait probablement une réponse tardive due à des contraintes physiologiques. Cette différence est aggravée par le fait que BIOSIM surestime légèrement le taux de développement à 20 °C (voir ci-dessous). Compte tenu de l'importance de la réponse des premiers stades de développement aux températures dans la chronologie globale de la phénologie post-diapause et de l'exposition probable des premiers stades à de basses températures, il est essentiel d'améliorer le modèle de développement pour les premiers stades à basses températures. Le modèle s'améliore en simulant le développement global à 10 °C (R^2 = 0,82, fig. A2). Les taux de développement des stades L2, L4 et L5 à cette température sont surestimés (fig. B2). À 15 °C, l'ajustement du développement global (fig. A3) est excellent (R^2 = 0,98). Le taux de développement du stade L2 est surestimé par le modèle. Le modèle sous-estime les taux de développement des stades ultérieurs (L5 et L6). Le modèle s'accorde très bien au développement à 20 °C (R^2 = 0,97) avec seulement une légère surestimation après le stade L3 (fig. A4). À 25 °C (fig. A5), le modèle simule très bien le développement global (R^2 = 0,99). Les taux de développement des stades L2 et L4 sont légèrement surestimés, tandis que le taux des instars ultérieurs est sous-estimé, en particulier pour les femelles du stade L6. Le modèle n'est pas aussi performant à des températures plus élevées. À 30 °C et 35 °C (fig. A6 et A7, respectivement), le modèle ne fonctionne pas aussi bien

(R^2 = 0,68 et R^2 = 0,81, respectivement); il surestime le taux de développement du stade L2 à 30 °C et à 35°C et sous-estime le taux de développement aux stades ultérieurs (fig. B3 et B4).

Discussion

En résumé, le modèle phénologique actuel est très satisfaisant pour la prédiction du développement larvaire des colonies de laboratoire du SPI aux températures allant de 15 à 25 °C. Cela suggère que la phénologie des colonies actuelles n'est pas sensiblement différente de la phénologie des colonies utilisées pour paramétrer le modèle il y a plus de trente ans. Le modèle n'est pas aussi efficace pour les températures extrêmes, en particulier à 5 °C et à 30 °C. Les transferts thermiques requis à ces températures (voir Méthodes ci-dessus) sont simulés comme des changements instantanés d'un taux de développement à l'autre, ce qui est très peu susceptible de refléter ce qui se passe physiologiquement. En effet, un laps de temps peut être nécessaire pour que la physiologie de la larve s'adapte à la nouvelle température. Cela pourrait expliquer en partie pourquoi le modèle surestime presque systématiquement le taux de développement à ces températures. Cela souligne également les défis liés à l'utilisation d'estimations de taux de développement mesurés à des températures constantes pour modéliser le développement à des températures variables.

Partie 2 : Taux de développement pour les gradients environnementaux et génétiques

Pour évaluer la variabilité des taux de développement de la tordeuse dans l'ensemble de son aire de distribution géographique, il faut échantillonner différents sites et établir des colonies de laboratoire pour chaque échantillon. À notre connaissance, aucune nouvelle colonie de tordeuses des bourgeons de l'épinette n'a été établie à partir de populations sauvages depuis le développement des colonies du SPI il y a plus de 30 ans. La tâche peut être difficile en raison de l'absence de protocoles publiés et des niveaux élevés potentiels de mortalité et d'une faible fécondité dus aux microsporidies et aux virus. Dans le but de réduire au maximum le risque de contamination croisée qui mènerait à l'effondrement des colonies, nous avons élevé les larves individuellement et accouplé les adultes en paires séparées (plutôt qu'en plaçant un grand nombre de mâles et de femelles dans le même contenant). Les agents infectieux ont été vérifiés régulièrement tout au long du processus afin que les spécimens infectés puissent être retirés. Il a fallu trois employés de mars à octobre 2017 pour achever l'élevage de cinq populations, de l'extraction des larves L2 en diapause à la génération suivante de larves L2 en diapause. Nous décrirons ci-dessous le protocole que nous avons utilisé et les résultats des premiers traitements thermiques pour la population de l'Ontario.

Méthodes d'échantillonnage et d'élevage pour les populations sauvages

L'objectif de l'échantillonnage était de couvrir l'aire de distribution géographique maximale de la tordeuse. Dans le même temps, des échantillons ont dû être prélevés dans des zones actuellement infestées ou ayant récemment été infestées afin d'optimiser les chances d'avoir suffisamment de larves pour commencer les colonies. Nous croyons que les cinq populations que nous avons échantillonnées (fig. 1) représentaient le maximum du possible, compte tenu des niveaux de population actuels dans l'ensemble de l'aire de distribution. Si des infestations devaient se produire dans d'autres régions, il serait

intéressant d'ajouter des sites d'échantillonnage entre l'Alberta et l'Ontario, à la limite sud de l'aire de distribution, et à Terre-Neuve.

Notre protocole d'échantillonnage a suivi la méthode de Morris (1995) : 3 branches de 75 à 100 cm de longueur ont été prélevées sur la cime d'une trentaine d'arbres dans chaque site, à l'exception de la population québécoise qui a été échantillonnée dans 18 sites le long d'un transect allant de Manic-5 à Fermont. Les branches ont été séparées de l'arbre source et conservées dans de la toile ou des sacs en plastique pour le stockage et l'expédition. Les échantillons ont été prélevés de juin 2016 à mai 2017 (tableau 1)

Tableau 1 : Résumé des sites d'échantillonnage.

Prov/T	Date	Location	Lat	Long	Hôte	Contributeur aux échantillonages
T.N.-O.	02-05-2017	Inuvik	67.5	-133.7	Eb	Martin Callaghan (For. Mgt. Division, T.N.-O.)
AB	05-04-2017	High Level	58.6	-118.2	Eb	R. Hermanutz (Alberta Agriculture and Forestry)
ON	01-03-2017	Timmins	48.6	-82.1	Sb, En	G. Brand (CFS-CFGL)
QC	19-09-2016	Manic-5	50.7	-68.7	Sb, En	L. deGrandpré et son équipe (CFS-CFL)
NB1	28-06-2016	Campbellton	47.8	-66.4	Sb	R. Johns et son équipe (CFS-CFA)
NB2	07-03-2017	Balmoral	47.8	-66.7	Sb	R. Johns et son équipe (CFS-CFA)

(Eb: Epinette blanche, Sb: Sapin baumier, En: Epinette noire)

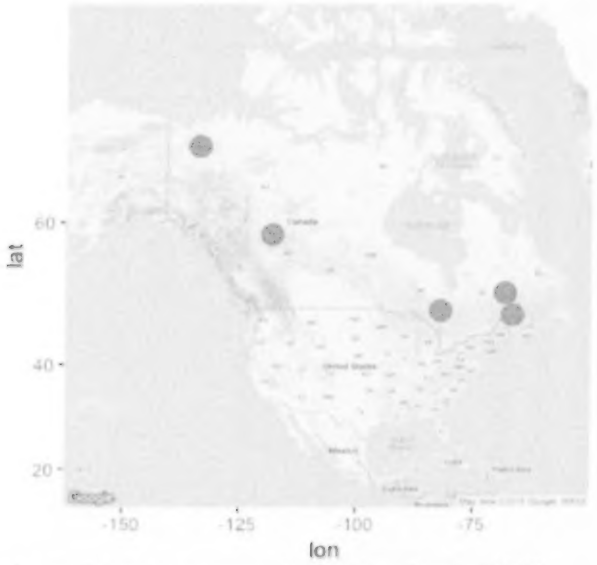

Figure 1. Localisation des populations sauvages échantillonnées en 2017.

Méthode d'extraction

Si les échantillons ont été prélevés au printemps, l'extraction des larves a été effectuée immédiatement après la réception des branches. Les branches recueillies en automne ou en hiver pendant la diapause ont été conservées à 4 °C, 70 % RH dans l'obscurité jusqu'au printemps suivant. Traditionnellement, il existe deux méthodes pour extraire les larves hivernantes des branches (Sanders, 1980). La méthode du

« cône de papier » consiste à envelopper des échantillons de branches coupées en petits faisceaux dans un papier en forme de cône suspendu au-dessus d'un évier rempli d'eau. Les larves L2 émergentes sont recueillies lorsqu'elles rampent sur le papier ou lorsqu'elles flottent à la surface de l'eau après être tombées des branches. La méthode de la « boîte fermée » consiste à placer les branches dans des boîtes opaques en forme de pyramide munies de tubes transparents dirigés vers le haut et pointant vers une rangée de lumières. Les larves à la phototaxie positive sont recueillies à l'aide des tubes. Les deux méthodes ont été comparées en utilisant les échantillons de l'Ontario et du Québec. La méthode de la boîte fermée a été bien moins efficace que la méthode du cône de papier. Il y a eu plusieurs problèmes avec la méthode de la boîte fermée qui ont pu limiter son succès. Tout d'abord, de la moisissure s'est développée dans les boîtes dans lesquelles une serviette en papier imbibée d'eau a été mise en place autour de la base des branches. Le niveau élevé de moisissure dans les boîtes peut avoir causé la mort des larves ou limité leur déplacement vers le haut. Les tubes en verre ouverts contenant de la gaze imbibée d'eau étaient une deuxième option pour apporter une légère humidité dans la boîte sans toucher directement les branches. Cela semble avoir eu peu de conséquences sur l'émergence par rapport aux boîtes complètement sèches, mais a néanmoins limité la formation de moisissure. Troisièmement, beaucoup de boîtes présentaient des niveaux de mortalité visibles à l'intérieur, sur le fond de la boîte. Si cette méthode est mise à l'essai, il faut faire attention aux niveaux d'humidité. Il est également recommandé que les morceaux de branches placés à l'intérieur de la boîte restent aussi intacts que possible et que les boîtes ne soient pas trop remplies, ce qui permet aux larves de se déplacer vers le haut dans les meilleures conditions. Contrairement à la méthode de la boîte fermée, les branches de la méthode du cône de papier sont entièrement visibles pendant l'émergence, ce qui permet de repérer et de recueillir davantage de larves, plutôt que d'attendre que celles-ci rejoignent d'elles-mêmes une zone de collecte. De plus, les niveaux d'humidité peuvent être plus facilement contrôlés avec les branches exposées. Un problème avec cette méthode est la perte considérable d'aiguilles. Les éviers doivent être nettoyés presque tous les jours avec un dispositif filtrant après la collecte des larves à la surface de l'eau. Parfois, la quantité d'aiguilles dans l'évier a rendu la collecte difficile, car la surface de l'eau s'en retrouvait obscurcie. De plus, l'eau devait être changée chaque semaine afin d'éviter la formation de moisissures sur les aiguilles flottant à la surface de l'eau. Enfin, un autre problème avec les deux méthodes a été la collecte d'espèces non ciblées. Lorsque les larves sont au stade L2, il est difficile de les identifier par espèce. Souvent, l'espèce des larves ne pouvait être identifiée qu'aux instars ultérieurs, lorsque celles-ci avaient déjà été placées sur le milieu nutritif. Les espèces non ciblées ont été éliminées à ce moment-là. Le nombre de larves extraites des échantillons allait de 4 466 au N.-B. à 648 dans les T.N.-O. (tableau 2).

Méthodes d'élevage

Une fois les larves recueillies, elles ont été placées individuellement sur le milieu nutritif artificiel de la tordeuse des bourgeons de l'épinette de McMorran dans des coupes de 22 mL munies d'un couvercle en carton. Comme les populations étaient sauvages et contenaient d'éventuels agents pathogènes, le milieu nutritif contenait du Fumidil-B à 4 000 ppm (van Frankenhuyzen et coll., 2004). Les coupes ont été étiquetées selon la population et la date de collecte, puis placées dans une chambre à 20 °C. Le milieu nutritif a été changé tous les 14 jours. Pour chaque population, un sous-groupe de 10 à 12 % des larves de stade L4 ou L5 était testé contre les agents pathogènes. Les résultats de ces tests (tableau 2) ont dicté le niveau d'isolement requis pour l'accouplement des adultes dans chaque population. Les populations présentant peu ou pas d'infections virale ou fongique ont été placées dans plusieurs groupes

d'accouplement groupé ainsi que dans plusieurs groupes d'accouplement simple. Si les niveaux d'agents pathogènes étaient moyens à élevés, seuls les accouplements simples (un à deux mâles et une à deux femelles par groupe d'accouplement) ont été utilisés. Une fois les accouplements simples terminés, chaque femelle adulte utilisée pour l'accouplement a été envoyée au laboratoire de contrôle de la qualité pour l'analyse des agents pathogènes. Si des champignons ou plus d'un type de virus étaient trouvés, les œufs produits par cet accouplement étaient jetés. Cette procédure est nécessaire en raison du transfert vertical potentiel des microsporidies (van Frankenhuyzen et coll., 2007). Les taux d'infection par microsporidies étaient élevés en Alberta, tandis que les taux de VPN et d'EPV étaient élevés en Ontario et au Québec (tableau 2).

Tableau 2 : Taux d'infection dans les échantillons sauvages prélevés en 2016 et 2017.

Origine de la population	N° de larves extraites	% de microsporidies	% de VPN	% de EPV
AB	2370	36.5	8.7	0.0
T.N.-O.	648	1.2	9.5	0.0
NB	4466	6.8	15.0	1.6
ON	1084	10.8	41.2	5.9
QC	765	0.0	33.9	32.1

Une analyse de 20 ans sur la phénologie simulée de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans son aire de distribution

Alors que nos expériences d'élevage de colonies sauvages commencent à produire des données empiriques pour mesurer la variabilité de la phénologie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans son aire de distribution naturelle, nous pouvons d'ores et déjà établir une base de référence en simulant la phénologie de la tordeuse dans différents sites en utilisant des données météorologiques historiques et le modèle phénologique actuel. Nous présentons ici une analyse de la simulation de la phénologie de la tordeuse des bourgeons au cours des 20 dernières années dans divers sites de son aire de distribution. Nous avons téléchargé les données de température quotidiennes d'Environnement Canada depuis les 20 dernières années pour cinq stations météorologiques près des sites d'échantillonnage des populations sauvages, soit Inuvik (T.N.-O.), High Level (Alb.), Timmins (Ont.), Baie Comeau (Qc) et Fredericton (N.-B.). Nous avons utilisé la méthode non paramétrique de Sen (1968) pour déterminer les tendances linéaires dans la série temporelle et le test de Pettit (1979) pour identifier les points de changement (c.-à-d., les changements brusques dans la série temporelle). Pour la période 1998-2017, les températures quotidiennes moyennes annuelles pour chaque site (fig. 2) montrent un réchauffement significatif à Inuvik (+0,11 °C/an, $p<0,001$). Les graphiques semblent indiquer un léger refroidissement dans l'est du Canada, mais aucune tendance significative n'a été détectée. L'analyse du point de changement a révélé un changement probable à Inuvik en 2007 avec un taux de réchauffement accru (+0,17 °C/an, $p<0,001$ pour 2007-2015). Des points de changement ont été détectés dans les autres sites, mais ils n'ont révélé aucune tendance significative.

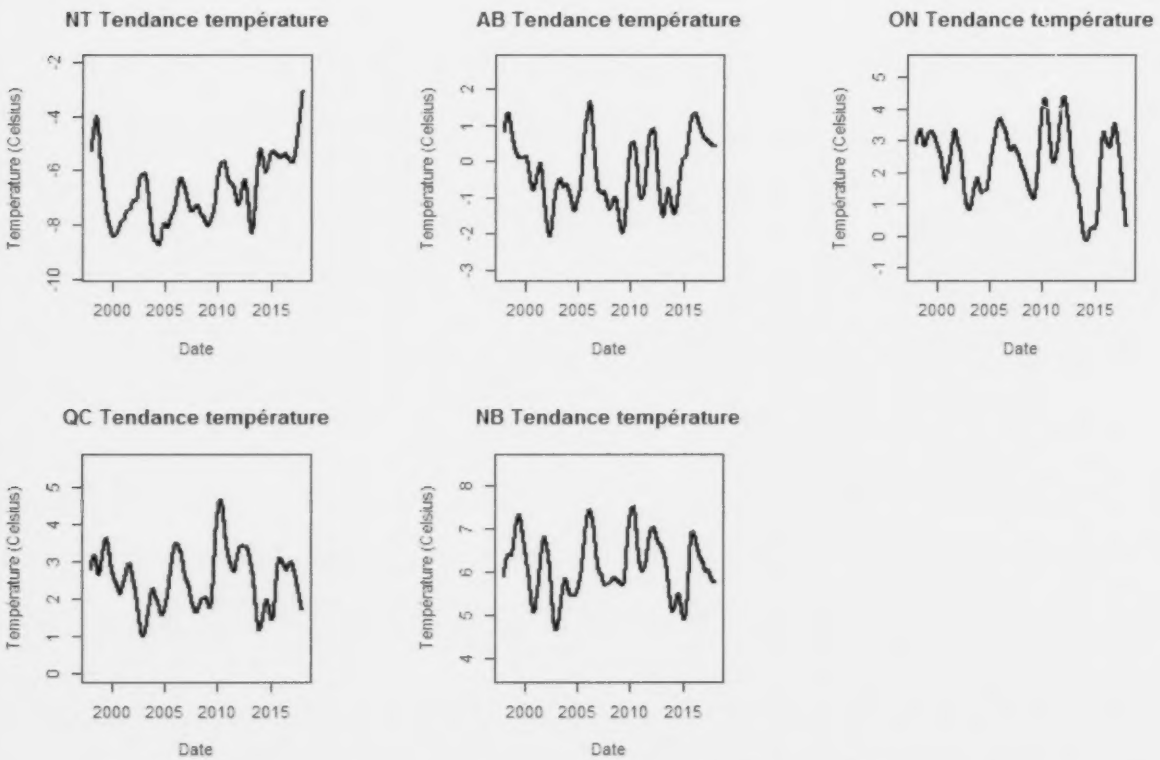

Figure 2. Tendances de la température quotidienne moyenne entre 1998 et 2017 pour 5 stations météorologiques à proximité des sites d'échantillonnage : Inuvik (NT), High Level (AB), Timmins (ON), Baie Comeau (QC) et Fredericton (NB).

La phénologie annuelle de la tordeuse des bourgeons de l'épinette a été simulée pour chaque site en utilisant les enregistrements de température quotidiens et BIOSIM. Les temps de développement dans chaque site (fig. 3) montrent une différence marquée du nombre de jours au stade L2 (L2o) hivernant, avec une durée accrue dans les T.N.-O., suivi du Qc, de l'Alb., de l'Ont. et du N.-B. En moyenne, le stade L2o dure 38 jours de plus à Inuvik qu'à Fredericton. Il est à noter qu'au stade L3, le classement des sites est presque inversé : ce stade est plus court dans les T.N.-O., suivie de l'Alb., de l'Ont., du Qc et du N.-B.

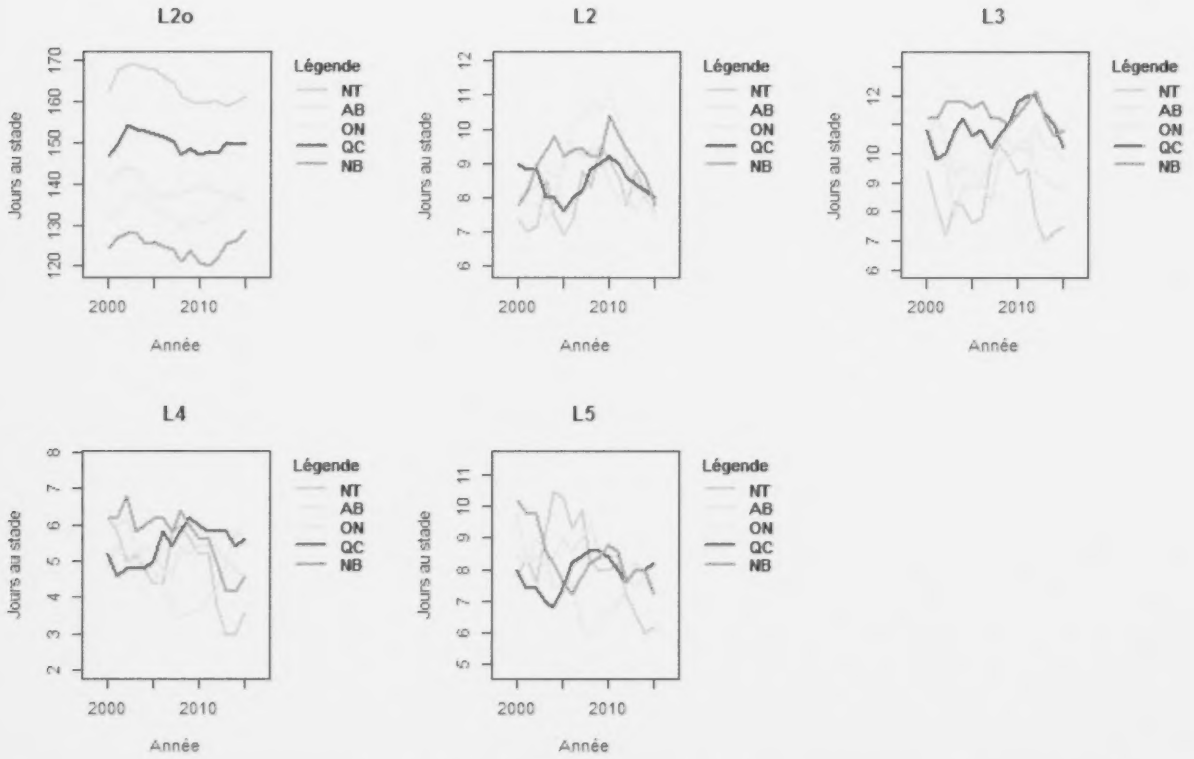

Figure 3. Temps de développement simulés à chaque stade larvaire pour cinq stations météorologiques à proximité des sites d'échantillonnage.

Les analyses de tendances révèlent des tendances significatives pour différents stades larvaires dans plusieurs sites. Dans les T.N.-O., la durée diminue considérablement aux stades L2o (-0,7 j/an), L4 (-0,2 j/an), L5 (-0,2 j/an) et L6 (-0,4 j/an) depuis 1999. En Alb., la durée diminue aux stades L2o et L6 (-0,4 j/an et -0,1 j/an, respectivement), mais elle augmente au stade L3 (+0,1 j/an). En Ont., la seule tendance significative cernée est une légère augmentation de la durée du stade L6 (+0,1 j/an). Au Qc, le stade L4 affiche une légère hausse (+0,1 j/an). Au N.-B., la durée du stade L6 affiche une tendance positive significative (+0,2 j/an).

Lorsque la durée du développement est additionnée du stade L2o au stade pupal (fig. 4), la durée totale diminue significativement dans les T.N.-O. (-0,7 j/an, $p<0,05$) et de façon presque significative en Alb. (-0,6 j/an, $p = 0,06$).

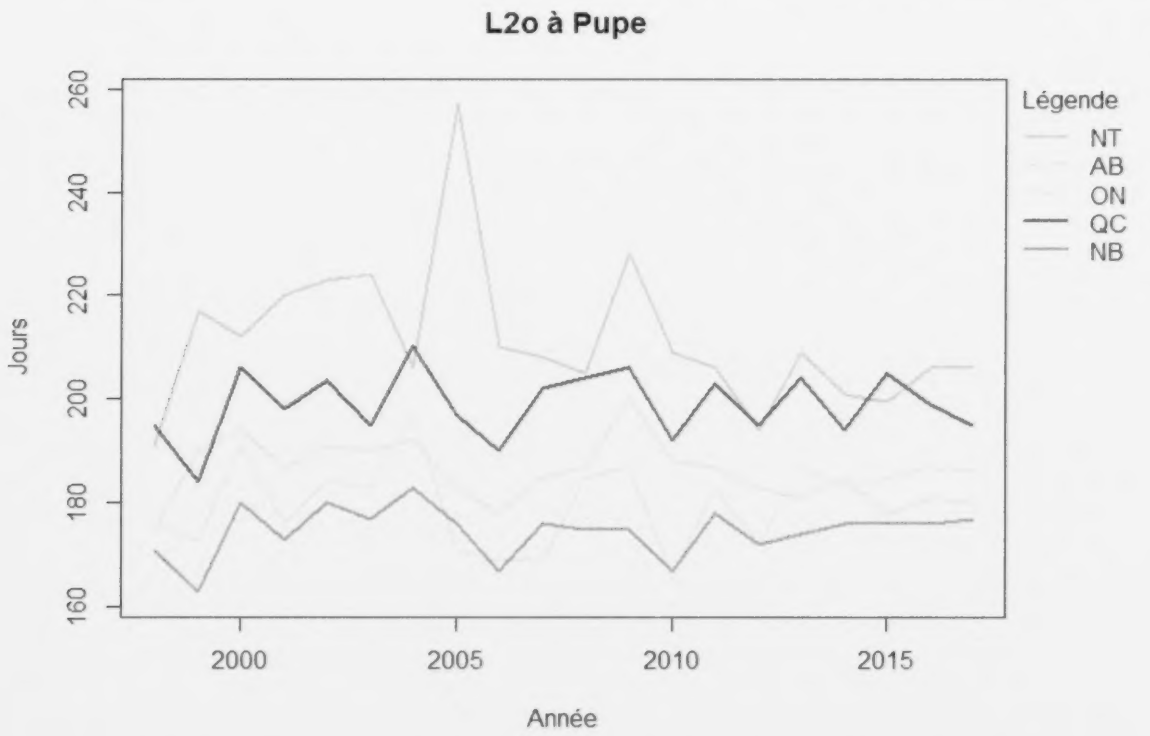

Figure 4. Temps de développement simulé pour atteindre le stade pupal près des sites d'échantillonnage des populations sauvages.

Taux de développement de la colonie de l'Ontario à 30 C et 35° C

Au moment de la rédaction de ce rapport, nous avons terminé l'élevage de la colonie de l'Ontario à 30 °C et à 35 °C. Les autres traitements thermiques (c.-à-d., 5, 10, 15, 20 et 25 °C) sont toujours en cours de réalisation. Nous avons également démarré l'élevage de la colonie du Québec. Les autres colonies sont toujours en diapause. Le début des traitements thermiques pour ces dernières est prévu entre fin janvier (N.-B.) et début avril (T.N.-O.). Le protocole expérimental utilisé pour l'élevage des colonies sauvages est identique au protocole utilisé pour les colonies de laboratoire du SPI.

À 30 °C, le développement de la colonie de l'Ontario semble plus lent que dans les prévisions de BIOSIM (fig. 5). Cela est similaire à ce qui a été observé avec la colonie du SPI. Le développement observé au stade L2 (fig. 6) est plus lent que le développement simulé et légèrement plus lent que le développement de la colonie du SPI. Ceci est en partie compensé par un développement plus rapide des colonies de l'Ontario et du SPI au stade L5 par rapport aux prévisions du modèle. Le modèle prédit bien le développement des stades L3 (mieux qu'il ne le prédit pour les colonies du SPI) et L6.

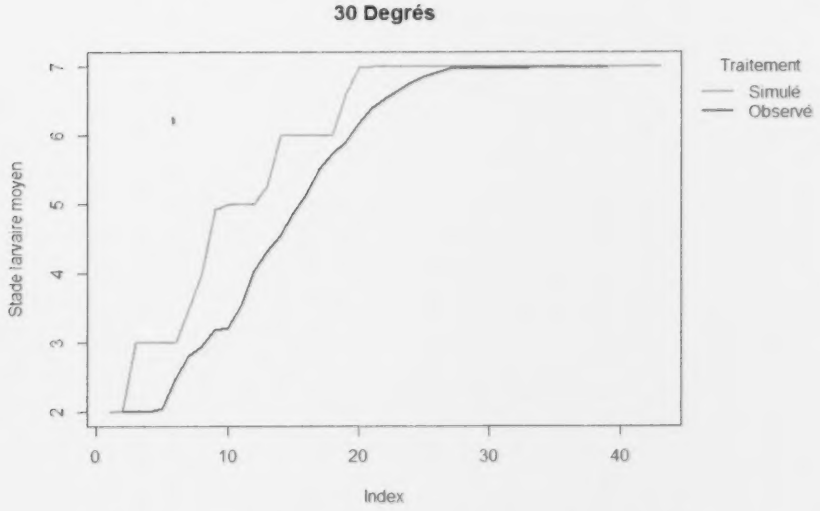

Figure 5. Développement moyen des instars de la colonie de l'Ontario par rapport à la simulation de BIOSIM à 30 °C.

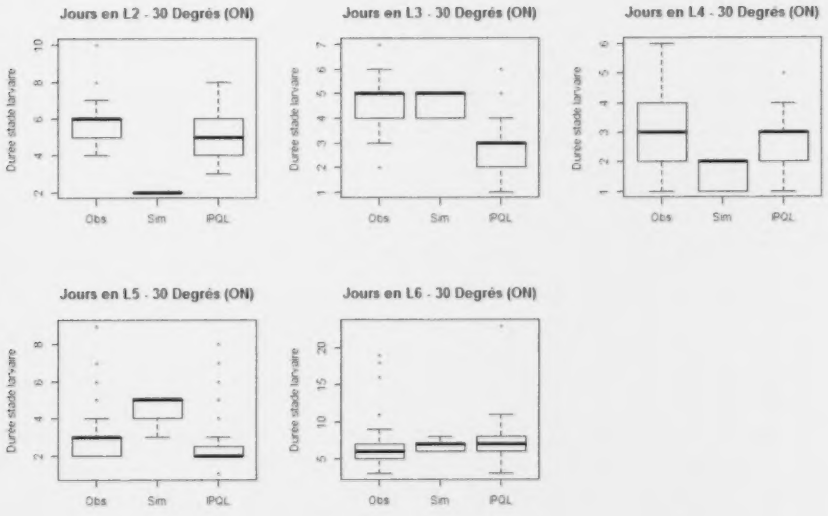

Figure 6. Développement des instars de la colonie de l'Ontario par rapport à la simulation de BIOSIM et à la colonie du SPI à 30 °C.

À 35 °C, le développement observé est encore une fois plus lent que le développement simulé (fig. 7). Le développement de la colonie de l'Ontario est plus lent que dans les prévisions du modèle aux stades L2 et L4 et, dans une moindre mesure, au stade L6 (fig. 8). Le modèle est conforme aux observations effectuées aux stades L3 et L5.

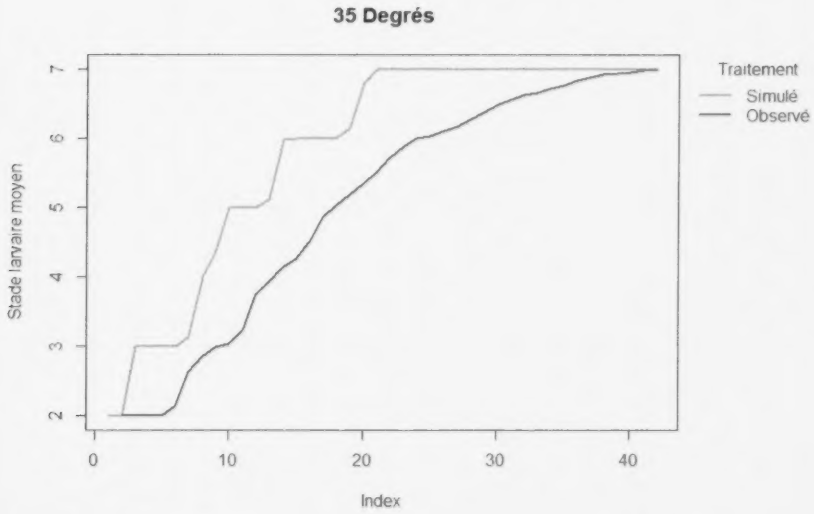

Figure 7. Développement moyen des instars de la colonie de l'Ontario par rapport à la simulation de BIOSIM à 35 °C.

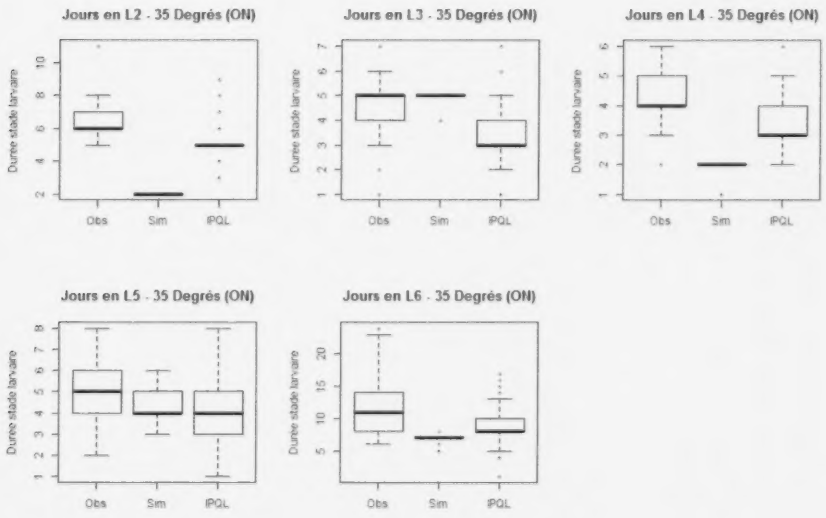

Figure 8. Développement des instars de la colonie de l'Ontario par rapport à la simulation de BIOSIM et à la colonie du SPI à 35 °C.

Résumé

En résumé, les résultats préliminaires pour la colonie de l'Ontario suggèrent que le modèle surestime le taux de développement à 30 °C et à 35 °C, un résultat qui est cohérent avec ce qui a été observé sur la colonie du SPI. Cependant, il est important de d'indiquer : (1) que les transferts thermiques requis pour l'élevage de la tordeuse à ces températures ne sont probablement pas bien pris en compte dans le modèle, comme nous l'avons déjà souligné; et (2) que les différences entre les taux de développement observés et simulés des premiers instars tels qu'observés ici ont probablement peu d'impact sur la facilité d'utilisation du modèle, car il est peu probable que les premiers stades larvaires soient exposés à ces températures.

Remerciements

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier des membres de SERG-international (NSDNR, SOPFIM, AB-AAF, SK MOE et OMNRF) et le soutien en nature d'AB-AAF et du gouvernement des T.N.-O. Le Centre de foresterie des Grands Lacs du Service canadien des forêts a fourni un soutien financier et en nature important. Nous remercions Courtney Irwin, Alice Liu et Emilie Vaillancourt pour leur aide dans les élevages au laboratoire. Nous remercions Stephane Bourassa (SCF-CFL), Gord Brand (SCF-CFGL), Roger Brett (SCF-CFN), Martin Callaghan (Ressources environnementales et naturelles, T.N.-O.), Louis De Grandpré (SCF-CFL), Ryan Hermanutz (Agriculture et Forêts, Alb.), Rob John (SCF-CFA), Greg Pohl (SCF-CFN) et Joris Wiersinga (FPL) pour leur aide dans l'échantillonnage des branches ayant servi à cette expérience. Sans eux, cet échantillonnage à grande échelle n'aurait pas été possible.

Références

Cooke, B.J.; Régnière, J. 1999. Predictability and measurability of *Bacillus thuringiensis* efficacy against spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae). Environmental Entomology 28(4): 711-721.

Morris, R.F. 1955. The development of sampling techniques for forest insect defoliators, with particular reference to the spruce budworm. Canadian Journal of Zoology, 1955, 33:225-294

Régnière, J.; Saint-Amant, R.; Béchard, A. 2014. BIOSIM 10 – Guide de l'utilisateur. Ressour. Nat. Can., Serv. can. for., Cent. for. Laurentides, Québec (Québec). Rapp. Inf. LAU-X-137.

Régnière, J.; St-Amant, R.; Duval, P. 2012. Predicting insect distributions under climate change from physiological responses: spruce budworm as an example. Biol. Invasions 14:1571-1586.

Régnière, J. 1987. Temperature-dependent development of eggs and larvae of *Choristoneura fumiferana* (Clem.) (Lepidoptera: Tortricide) and simulation of its seasonal history. The Canadian Entomologist 119: 717-728.

van Frankenhuyzen, K.; Ebling, P.M.; McCron, B.; Ladd, T.R.; Gauthier, D.; Vossbrinck, C. 2004. Occurrence of Cytosporogenes sp. (Protozoa, Microsporidia) in a multi-species insect production facility and its elimination from a colony of the eastern spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* (Clem.) (Lepidoptera: Tortricidae). Journal of Invertebrate Pathology 87: 16-28.

Volney, W.J.A.; Cerezke, H.F. 1992. The phenology of white spruce and the spruce budworm in northern Alberta. Canadian Journal of Forest Research 22(2): 198-205.

Weber, J.D.; Volney, W.J.A.; Spence, J.R. 1999. Intrinsic development rate of spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) across a gradient of latitude. Environmental Entomology 28 (2): 224-232.

Annexe A : Temps de développement simulés c. observés de la colonie du SPI à 7 températures constantes – Développement global

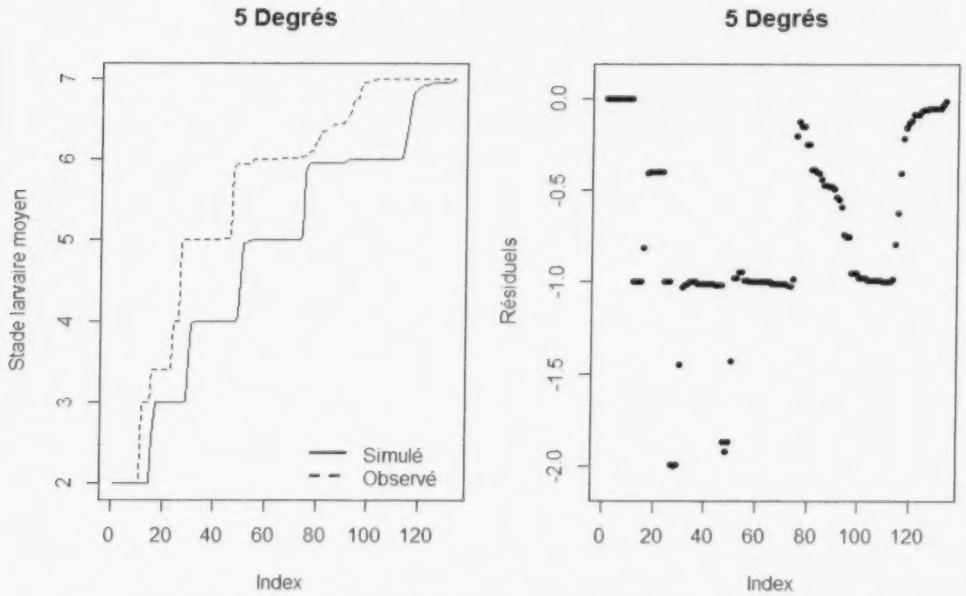

Figure A1. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 5 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

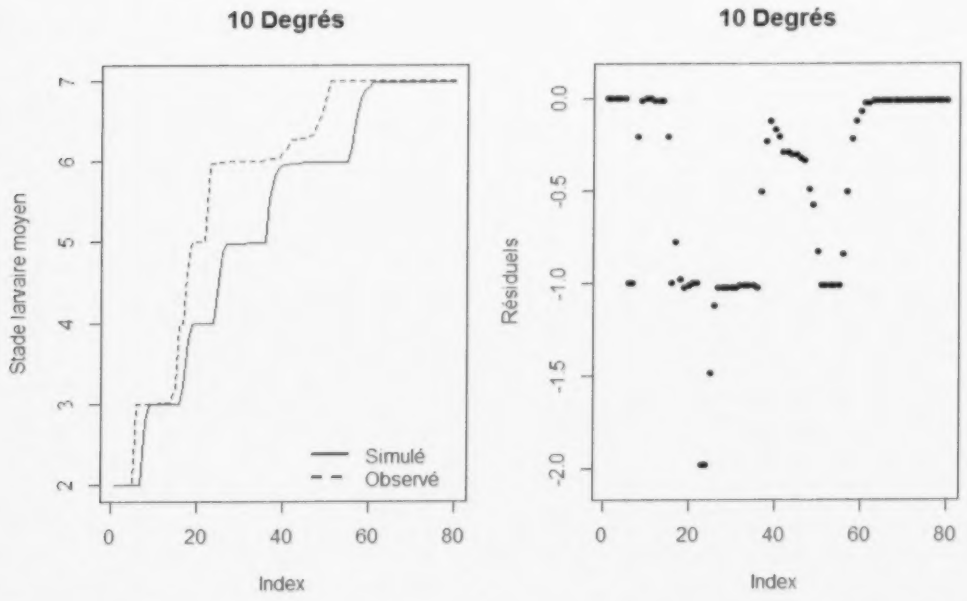

Figure A2. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 10 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

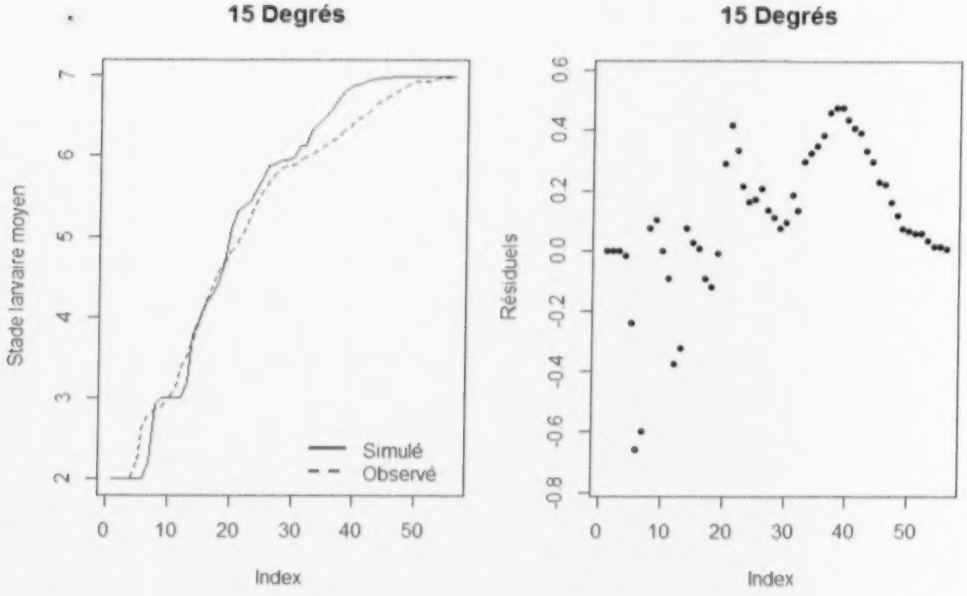

Figure A3. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 15 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

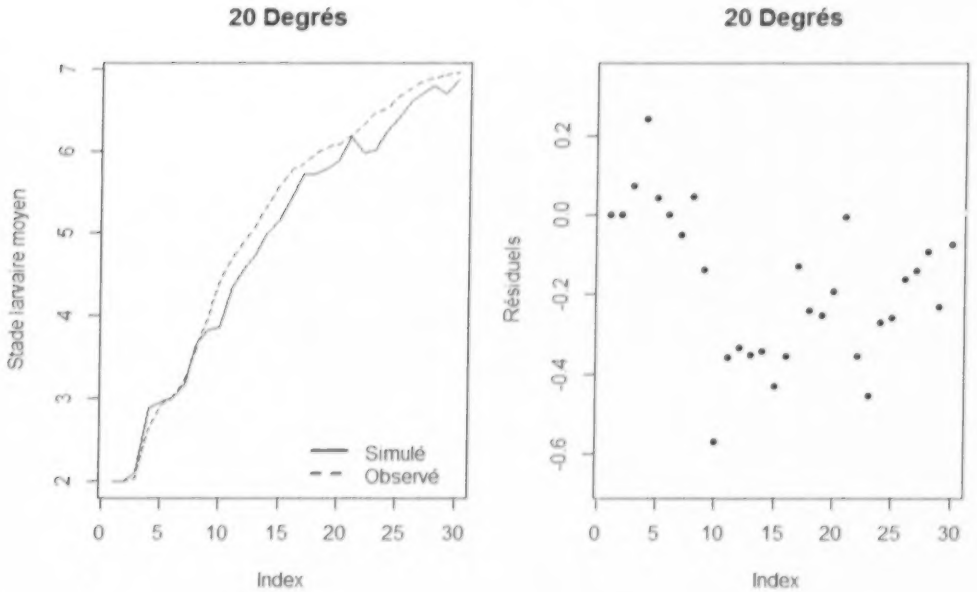

Figure A4. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 20 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

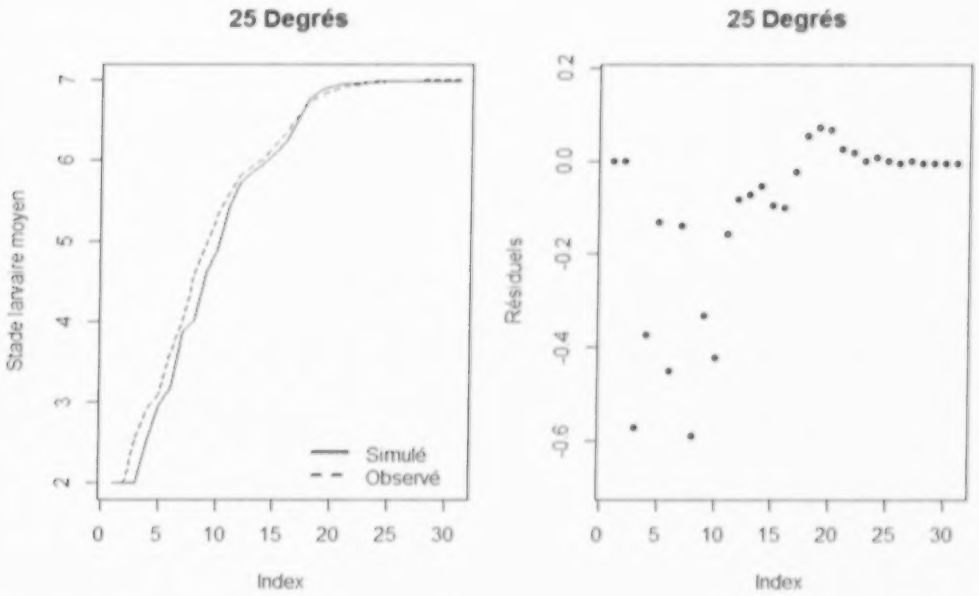

Figure A5. Comparaison entre les temps de développement simulés et observés à 25 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

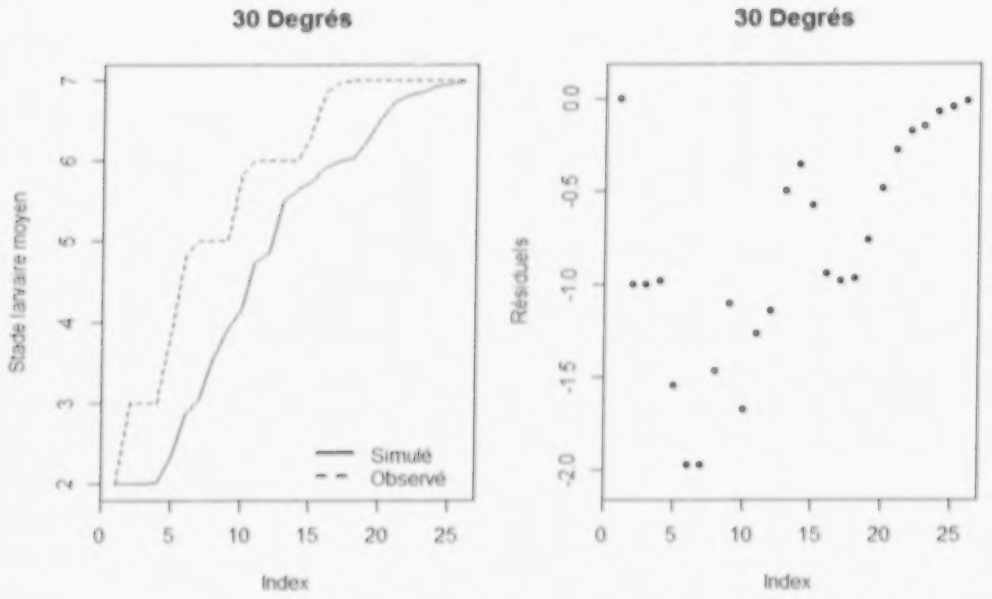

Figure A6. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 30 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

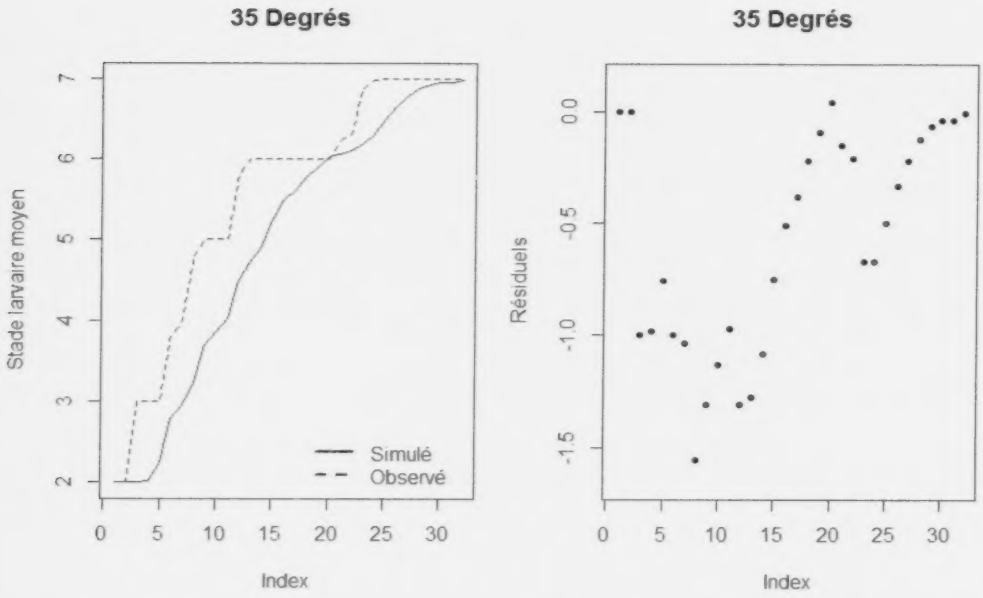

Figure A7. Comparaison entre les temps de développement simulés (ligne pointillée) et observés (ligne continue) à 35 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

Annexe B : Temps de développement simulés c. observés de la colonie du SPI à 7 températures constantes – Développement du stade larvaire

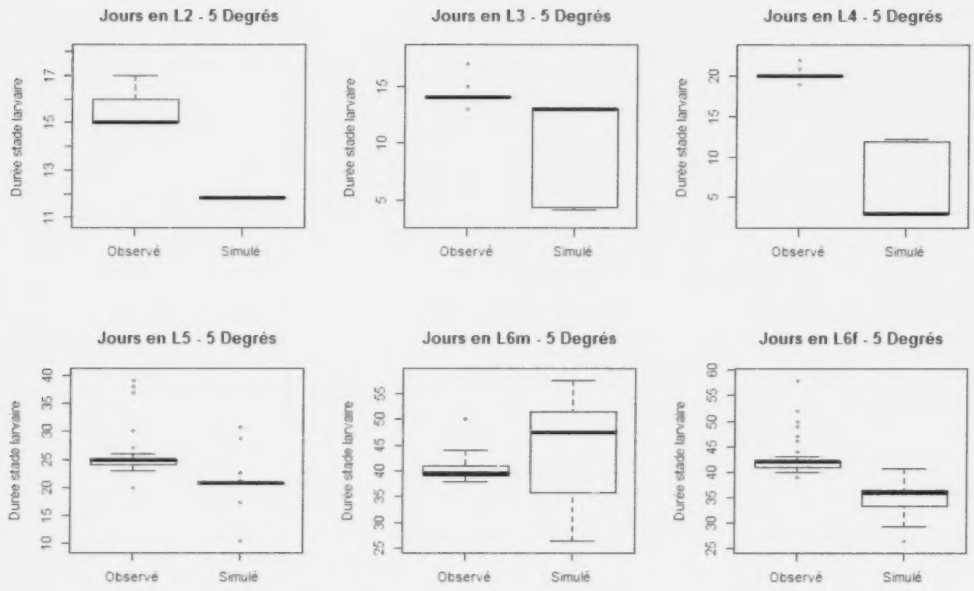

Figure B1. Comparaison entre les temps de développement simulés et observés à 5°C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

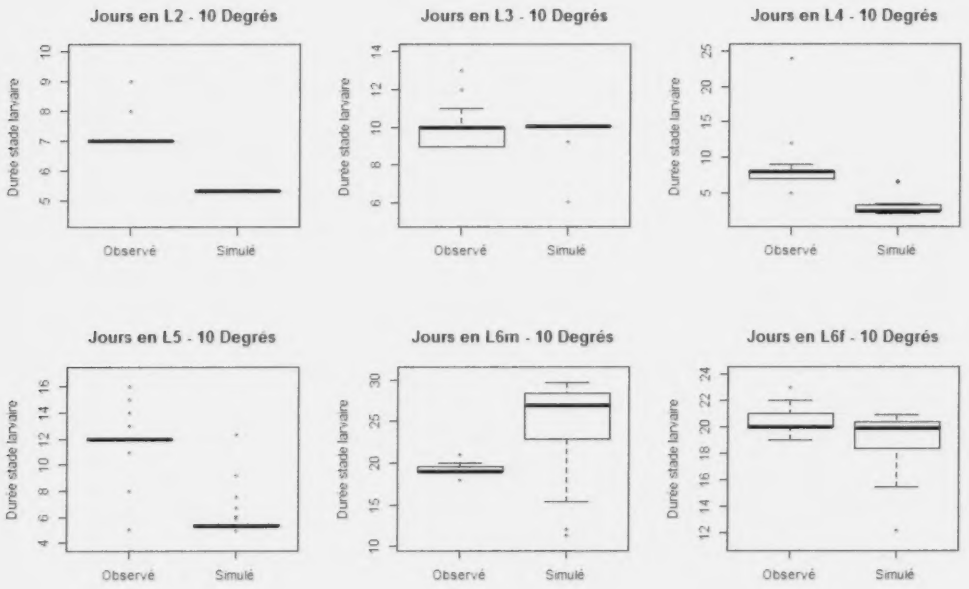

Figure B2. Comparaison entre les temps de développement simulés et observés à 10 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

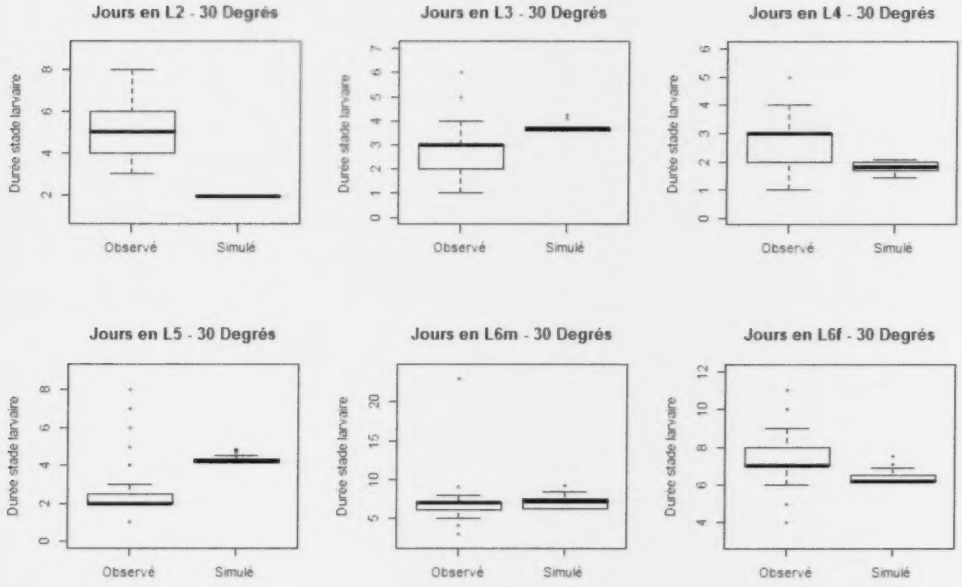

Figure B3. Comparaison entre les temps de développement simulés et observés à 30 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.

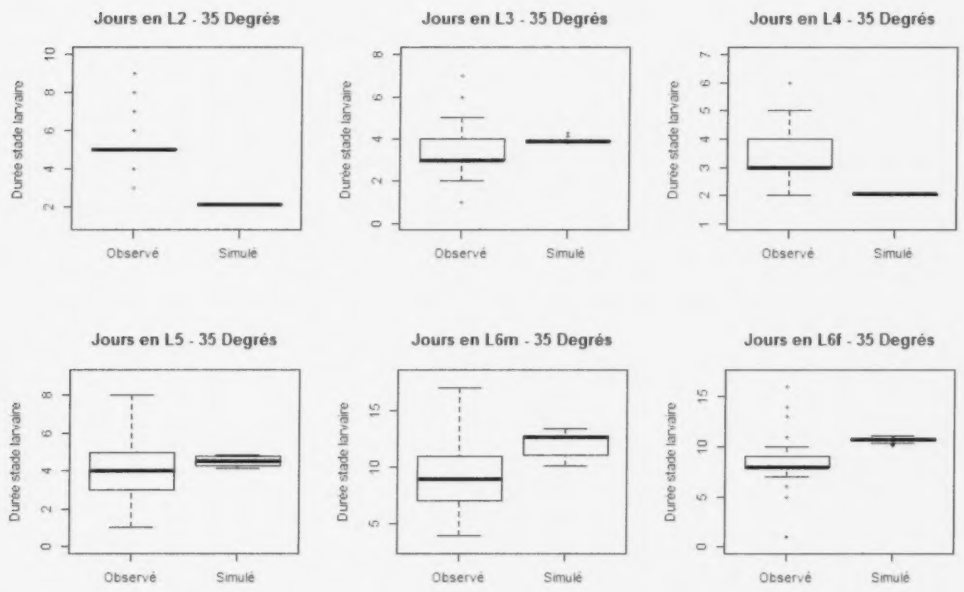

Figure B4. Comparaison entre les temps de développement simulés et observés à 35 °C pour la génération F0 de la colonie du SPI.